［Ｒ３．１．４］　音響モニタリングシステムによる往復動圧縮機の連続状態監視システム開発の研究開発

（圧縮機監視システムグループ）　　久保田 肇、濱口 一成、森川 照男、伊藤 常男
金高 伸幸、黒田 義嗣、星　 重治、前川 憲二

１．研究開発の目的

本研究は、製油所において重要機器となる往復動圧縮機に関して、最適な音響モニタリングシステムを開発し、連続運転の阻害要因となるシリンダバルブ故障を常時監視することによって健全性の確認/以上の早期検知を図り、製油所の長期連続運転に資することを目的とする。

２．研究開発の内容

２．１　往復動圧縮機の連続運転阻害要因と異常検知方法の選定（音響法）

往復動圧縮機について、故障物理に基づき連続運転阻害要因分析を行い、保全実績を併せて整理/分析した結果、バルブおよびロッドパッキンの推定寿命が短いことが確認された。中でも、バルブは送気機能を担うためプロセスの停止に繋がりやすく、連続運転中、重点的に監視すべき部位として、本研究対象に選定された。
往復動圧縮機はピストンの往復運動により吸入・圧縮・吐出・膨張のサイクルを繰り返すものであり、監視対象の吸入弁・吐出弁は、このサイクルの吸入・吐出工程のタイミングで瞬間的に作動する。個別に発生する作動音のデータを分析する常設型音響モニタリングシステムを開発し、生産設備で稼動している実機に試験適用し連続状態監視による研究を試みた。

２．２　常設型機器による音響データ連続収集/解析技術の開発

モニタリングシステムについては、各バルブ発生音の特徴を示す音響周波数帯域を 5 つ設定して（以下、特性周波数とする）、約 10 分毎にデータを収集/監視するシステムを構築し、機器正常時の状態をほぼ把握した。

２．３　異常信号評価技術の開発

異常判定を的確に捉えるため、意図的に軽微な不具合を付与したバルブの設置試験を行った結果、異常時は特性周波数の音圧レベルが低下する場合が多いことが明らかになり、判定の一つの方法として、閾値を下回った場合に異常とする妥当性が示された。
また、開放点検による機器状況詳細解析により主要部品であるバルブにごく軽微な不具合が認められた。このバルブを再度実機に組み込み得られた音響データと履歴データを解析した結果、異常時は卓越周波数の周波数特性が変化する（音圧が低下/増加する、または新たに音圧が増加する周波数が現れる）傾向が確認された。

実運用にて蓄積されたピーク値（特性周波数における音圧レベル）について時系列で傾向を観察した結果、バルブ板作動の微妙な差や作動音以外の影響によるものと考えられる、音圧レベルの大小やばらつきが確認された。これに対して統計解析を行い、シュハート管理図の理論に基づき各バルブの閾値を設定した。

２．４　音響モニタリングシステムの実用化評価

通常の生産運転をしていく中で様々な運転条件下において連続的にデータ収集を行い、ピーク値及び平均値と変動幅のトレンドデータ監視を継続した。実用化評価を目的として、対象往復動圧縮機の開放点検した際、再びバルブにごく軽微な異常が確認されたため、本システムによって軽微な不具合が検知できていたか否かについて解析した結果、バルブ毎に選定した特性周波数以外の 1600Hz、1750Hz 付近において、不具合時/正常時の特性が異なることが観察され、不具合の状態を捉えているものと推察された。開放点検前において、圧力／温度等の運転トレンドデータからは特に異常傾向がみられなかったことから、本手法により異常を早期に検知できる可能性が高いことが示唆された。

３．研究開発の結果

３．１ 往復動圧縮機の連続運転阻害要因と従来の保全方法

往復動圧縮機の構造部品は、各種圧縮機に共通する部品と取り扱いガスの種類や圧縮機型式により一部異なる部品で構成される。1996 年から 2003 年までの 8 年間にわたる保全経歴から、故障による部品の交換と定期点検による部品の交換履歴を調査した結果、圧縮弁の交換、弁板の交換、弁バネの交換、ピストンロッドの交換、ロッドパッキンリングの交換、ピストンリングの交換、ライダーリングの交換、主軸受の交換、クランク軸受の交換などが抽出された。このうち、部品毎の推定寿命がより短い順に、3 個の部品（バルブ、ピストン、軸封）が選定され、バルブ（図３．１参照）は送気機能を担いプロセスの停止に繋がりやすいことから、連続運転中、重点的に監視すべき部位として、本研究対象に選定された。故障の主な原因は、①リサイクルガスサービスの実ガス組成によるスケール分に起因した短寿命傾向と機器停止時のバルブへの固着、②オフガス系機器開放時、取扱ガス中塩化アンモンの大気中水分吸収による固着、作動不良、③弁バネの破損（現在、材質を SUS からインコネルへ変更）、④高圧サービスバルブのトラブル（多発することからリフト量の見直し等の対策あり）、⑤運転停止期間中バルブの内部錆付きによる作動不良、などが挙げられる。
尚、故障物理に基づく分析（LEAF: Life Estimation Analysis based on Failure Mechanism）により、バルブ板は、３年若しくは 24000 時間の部品推定寿命である結果が得られた（表３．１参照）。従来のバルブ保全方法は、機器の聴音による状態診断（時間基準型保全）が古くから行われており、診断の信頼性を向上すべく、音響信号を常時監視（状態基準型保全）して機器の異常判定が可能なシステムの開発を進めた。



図３．１　シリンダバルブ写真

表３．１　LEAF 結果

		納入時の取扱説明書	推定寿命	備　　　　考
バルブ	弁座	---	５年もしくは40000時間	２年で機械加工すると５年で
	弁受け	---	５年もしくは40000時間	使用限界 -1.0mmを越える（弁受けバネ孔摩耗）
	弁板	５００時間	３年もしくは24000時間	バルブ座シートとの当りにより摩耗し凹みが発生
	弁バネ	５００時間	３年もしくは24000時間	バルブ分解後の再使用不可（折損、へたり等）
	パッキン	５００時間	３年もしくは24000時間	
ﾋﾟｽﾄﾝ	ﾋﾟｽﾄﾝﾛｯﾄﾞ	---	２４０００時間（実績）	寸法測定により判定（寿命延長可能）
	ﾋﾟｽﾄﾝﾘﾝｸﾞ	２０００時間	８０００時間（実績）	寸法測定により判定（寿命延長可能）
	ﾗｲﾀﾞｰﾘﾝｸﾞ	---	８０００時間（実績）	寸法測定により判定（寿命延長可能）
軸封	ﾛｯﾄﾞﾊﾟｯｷﾝ	２０００時間	１６０００時間（実績）	寸法測定により判定（変形もあるため分解時交換）
	中間ﾊﾟｯｷﾝ	２０００時間	１６０００時間（実績）	寸法測定により判定（変形もあるため分解時交換）

３．２ 異常検知方法の選定（音響法）

往復動圧縮機はピストンの往復運動により吸入・圧縮・吐出・膨張のサイクルを繰り返すものであり、監視対象の吸入弁・吐出弁は、このサイクルの吸入・吐出工程のタイミングで瞬間的に作動する。往復動圧縮機クランク軸の回転数が仮に 375rpm とすると１秒間に 6.25 回バルブが作動するものと算出される。この１秒間に 6.25 回作動する圧縮弁について、回転信号に基づきバルブの開閉タイミングを抽出し、各バルブの音響データを選択的に収集／解析することにより、シリンダバルブの作動状態が監視できることを確認した(図３.２の時刻歴波形について矢印部が各バルブの作動タイミングを示す)。

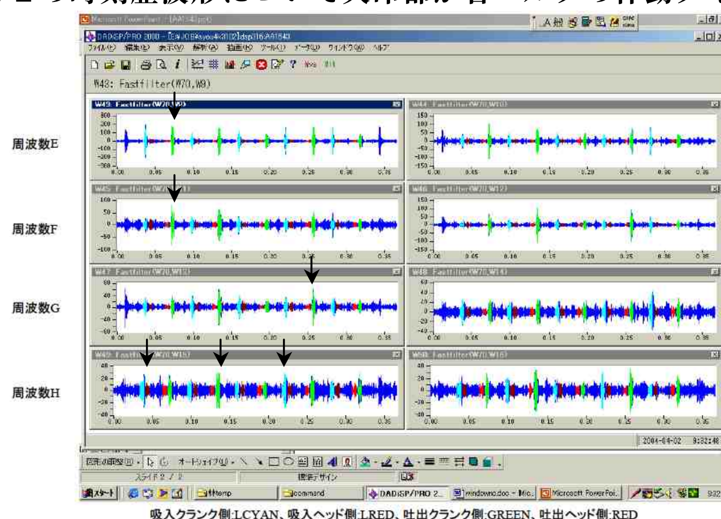


図３．２　バルブ音測定結果

実際の往復動圧縮機の音響データを時刻歴波形で表示すると、図３．３の左上の図のような音響信号となる。この音響信号は往復動圧縮機のバルブ音だけではなく外乱も含めた音響信号である。前述の方法により、監視対象とするバルブ作動音だけを抽出し、スペクトラム分析（図３．３の右下の図）を行い、対象バルブ開閉タイミング外のデータとの比較検討した結果、バルブ開閉タイミングのみ見られる音響信号のピークがあることが確認できた。このピークがバルブ開閉タイミングの特徴を示す一つの音響特性（特性周波数）として検討された。

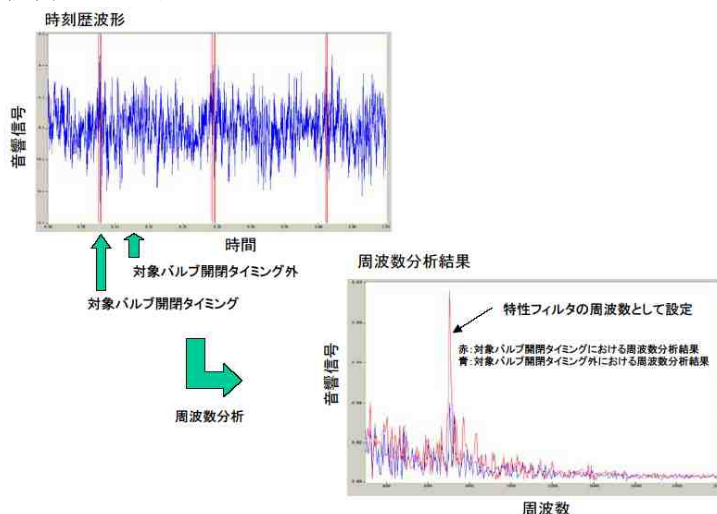
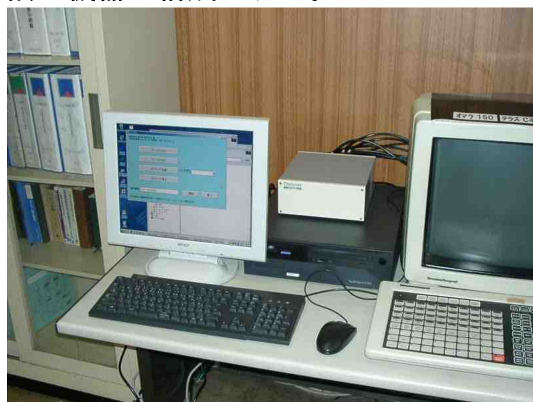


図３．３　初期特性周波数検討例

３．３ 常設型機器による音響データ連続収集/解析技術の開発

非常設型の音響測定においては、データ解析は事後処理であり、採用するデータの選択や解析パラメータの選定に関して試行錯誤的な検討が可能である。一方、常設型機器を用いた測定においては、データ処理を連続的に行う必要があることから、これらの項目が自動化されていないと実用的な運用は難しい。そこで様々な条件下で数多くのデータを蓄積することで、データ連続収集・自動解析における適切なデータ収集周期や解析手法を開発した。尚、本システムは本質安全防爆仕様を満たし、図３．４の写真に示す常設の機器で構成される。



音響ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞｼｽﾃﾑ（常設解析部）



音響ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞｼｽﾃﾑ(常設マイクロホン部)

図３．４　音響データ収集／解析システム

３．４ 異常信号評価技術の開発

３．４．１ 意図的製作の不具合バルブ適用実験

異常判定を的確に行うためには、数多くのトラブルデータを把握していることが望ましいことから、他装置の往復動圧縮機を用いて、意図的にバルブプレートおよびバネを加工して軽微な不具合のある状態を作り出し発生騒音並びに振動を測定した（図３．５参照）。

（１）バルブプレートの割れ

ガス通路外周より 2、3 リング目を径方向に切断、その 90°の位置にも径方向で切断を行った。バルブプレートにひび割れなどの異常が発生した場合、特性周波数における弁の打撃音が検出し難くなることが確認された。その原因としては、ひび割れ箇所のリークによる弁の挙動変化、およびプレートの構造固有値の変化などが考えられる。またプレートが割れると構造固有値が変化して周波数帯域がシフトするだけではなく、振動形態も変化することが予想され、その結果、正常弁と比較して明確な打撃音が現れなくなるものと考えられる。

（２）バルブプレートの磨耗

バルブプレートの表面が磨耗した場合、割れ同様バルブプレートの固有値が変化する可能性も挙げられるが、最大磨耗許容限度（板厚の 10%）を考えると構造固有値の変化よりも、磨耗箇所からのリークの影響の方が大きいものと考えられる。本試験においては吸入側に磨耗した弁を設置したところ振動信号・音響信号ともに大きく変化し、明確な打撃音が現れなくなった。理由の一つとして、シリンダの吸入工程において吸入側スナッバより磨耗箇所を通じてシリンダ内にガスが流入するため、弁の作動形態が安定した開閉運動からフラッタリング／チャタリングなど不安定な状態に変化したことが考えられる。正常弁を設置してある吐出側の信号にも打撃音が現れなくなった理由としては、吸入弁（磨耗）の振動・音響信号が外乱として吐出側に出ている可能性が挙げられると同時に、吐出弁の作動形態が変化した可能性も考えられる。この場合、シリンダの圧縮工程において吸入弁の磨耗箇所よりガスがリークするため、シリンダ内の圧力が下がり吐出弁の挙動も併せて不安定になったものと推測される。

（３）バネの折損

バルブバネ 8→4 本、緩衝バネ 8→4 本に減らし、設定した。バルブバネおよび緩衝バネに折損等の異常が発生した場合、弁の開閉運動（タイミング）に大きな変化はなく、また 8.0kHz より低周波帯域においてはフィルタ処理後音響信号にも明確な変化は現れなかった。従ってバネの折損を検知するためには、より高周波帯域のモニタリングが有効と考えられる。また、バネの異常自体が直接弁の挙動・パフォーマンスに与える影響は比較的小さく､圧縮機の性能低下を引き起こす可能性も比較的小さいことも確認できた。

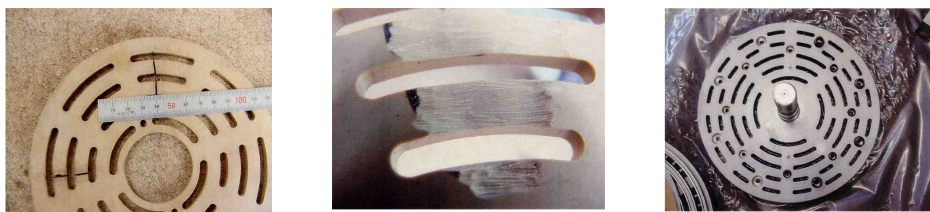


図３．５意図的製作不具合バルブ写真（左：割れ、中央：磨耗、右：スプリング破損）

３．４．２ 軽微な不具合バルブ適用実験

生産運転中に発生し、開放点検時に確認された軽微な不具合（軽微なひび割れ）を有するバルブプレートを再度実機に適用し、システムマイクロホンから得られた正常値と異常時のスペクトル分析結果と時間変動分析結果に基づき考察した。

分析結果からは正常時の卓越周波数における音圧が異常時において大幅に低下するケースと、または増加するケースが確認された。従って、正常時と異常時でスペクトル特性が異なることから、音響信号を用いた異常（軽微なひび割れ）検知が可能であるものと判断された。

尚、低下するケースと増加するケースについては、以下の現象が考えられる。

（イ）異常時に音圧が低下するケース

異常（軽微なひび割れ）により、バルブ打撃時のバルブプレートのインパクトが正常時と異なり、音圧レベルが低下する。または、バルブプレートの構造固有値が変化し、正常時の特性周波数の音圧レベルが低下するなど。

（ロ）異常時に音圧が増加するケース

異常（軽微なひび割れ）によりバルブプレートの構造固有値が変化することにより、正常時では現れなかった周波数の音圧レベルが増加するなど。

異常（軽微なひび割れ）を検知するために有効な特性周波数を絞り込むため、音圧の変化が比較的共通して現れる周波数を分析結果に基づき特定した。この検討から、900Hz、1600Hz、2500Hz 付近の周波数がシリンダ吐出クランク側／ヘッド側のバルブ固有の特性を表している可能性が特に高いものと判断された。

図３．６に 1600 Hz 近付における正常弁／異常弁試験データならびに 2004 年 6 月 17 日（A 号機への切り替え運転後）～2004 年 7 月 5 日(B 号機への切り替え運転前)までの期間の A 号機実運転データについて検討した結果を示す。分析、閾値は次項の統計解析に基づき検討されたものである。

結果として、大部分の実運転データは前述の軽微な不具合のあるバルブプレート実験から得られる閾値を下回り（または上回り）、異常時の傾向と近いことが確認された。従って、実運転データ収集時（2004 年 6 月 17 日）においては既に軽微なひび割れがあった可能性が高いものと推定された。

以上から、圧力、温度などの運転トレンドデータからは特に異常傾向が見られない程度のバルブ異常（バルブプレート外周に軽微なひび割れ）に対して、当該音響モニタリングシステムを用いた解析から異常傾向が確認可能であり、音圧レベルの下限値に閾値を設ける方法は、判定の一つとして妥当であるものと判断された。また異常時にレベルが卓越する傾向についても新たな知見として得ることができた。

尚、異常検知の閾値設定については統計解析手法を用いることによって、より明確に正常時と異常時を分離できることが示唆された。

本試験からシステムの高度化に繋がる有効なデータと分析結果を得ることができ、これらのデータを元に各フィルタの複合判定機能を設ける等システムのチューニングを行うことにより、バルブプレートの軽微なひび割れを検知することが可能になるものと考えられる。

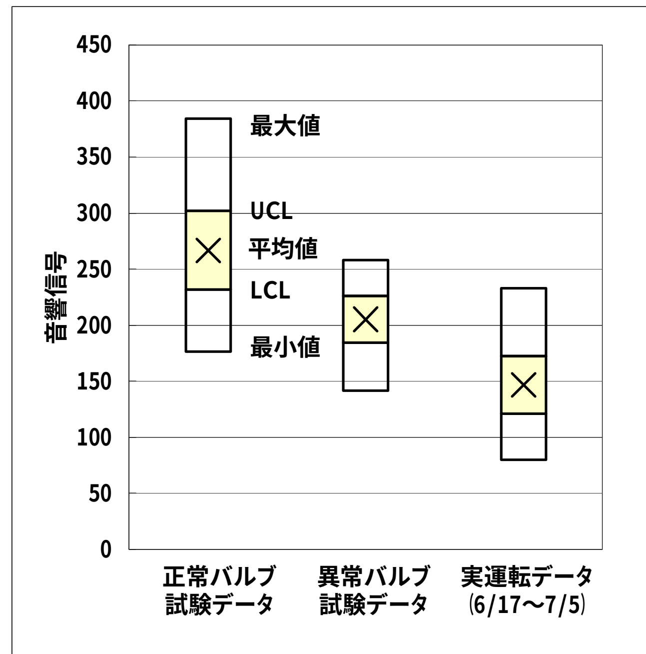


図３．６　異常バルブ試験データ／実運転データ傾向分析結果
（Ｃシリング吐出クランク側 1.6kHz）

３．４．３ 音響モニタリングデータ処理手法の最適化

音響モニタリング実運用にて蓄積されたピーク値について、時系列データの傾向を観察した結果、音圧レベルの大小など、ばらつきがあることが確認された。これは往復動圧縮機 圧縮弁のバルブ板作動音以外の影響や圧縮弁バルブ板動作の微妙な差による発生音の違いなどが原因として考えられる。正常/異常の判断について、測定毎１つのピーク値データの大小に左右されず、圧縮弁バルブ板作動音の変化傾向をより明確に捉えるために、ばらついているピーク値データの特徴や傾向について、統計解析を用いて観察し評価することを試み、異常判定方法の高度化を図った。

尚、具体的な統計解析方法は以下の通りである（図３．７参照）。

＜ステップ 1＞

音響モニタリング対象往復動圧縮機(Ｋ-3102Ａ／Ｂ)の全ての圧縮弁（全 32 個）のフィルタ毎(5 個)に、それぞれピーク値データをサンプリングする。サンプリング期間は 2004 年～2005 年の運転時のデータとする。

＜ステップ 2＞

圧縮弁のピーク値データの分布を調査するために、まずサンプリングデータを表計算ソフトのスプレッドシートへ入力し一覧表を作成する。一覧表からデータのｍｉｎ／ｍａｘを求める。次にサンプリングデータのｍｉｎ／ｍａｘの間を適当に等分する(本例は 50 等分とする)。

＜ステップ 3＞

任意に 50 等分した各区間のデータ数を集計する。

＜ステップ 4＞

各区間に分類したデータ数の累積を算出しグラフ上にプロットする。

上記ステップに基づきシュハート管理図の理論をもとに累積範囲の上下限 2.5%を省く95%範囲を有効範囲とし変動幅に設定した。
ここで、シュハート管理図は、特に工場などにおいて、安定された工程から生産される製品の性質が正規分布に基づくと仮定し、その平均値を中心として、それから標準偏差の 3 倍以上はなれた測定値の出現は 0.27%程度しかないことを統計的に示し、0.27%の範囲に相当する測定値が得られた時には異常が発生したものと判断する管理図法である。
シリンダバルブは基本的に安定した動作であり、その動作によって発生する音の特性も一定の範囲内にあるものと想定されるため、本管理図の考え方を取り入れた。
<ステップ 5>
累積上限（97.5%）を上方の閾値と仮設定する。
累積下限（ 2.5%）を下方の閾値と仮設定する。

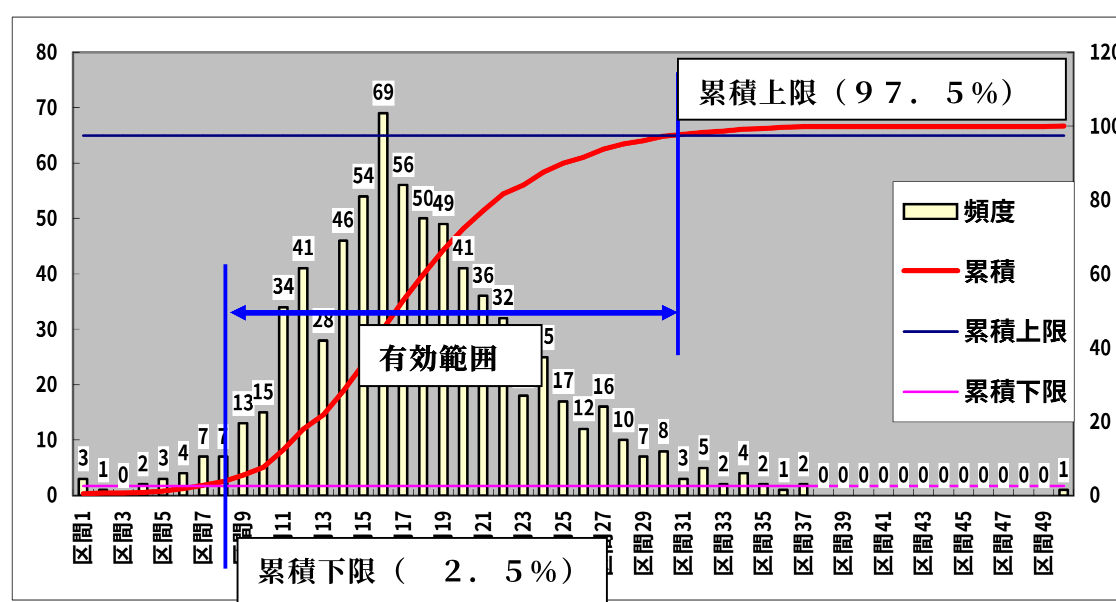


図３．７　統計解析方法の累積上限/下限

３．５ 音響モニタリングシステムの実用化評価

３．５．１ 往復動圧縮機開放時の機器状況確認結果

圧縮機開放点検により各シリンダの吸入弁及び吐出弁について状況詳細解析を行った結果、C シリンダの吐出弁ヘッド側及びボトム側共に弁板（PEEK 製）の外側端部に弁板を貫通（厚さ 6mm）した長さ約 10mm、幅約 2mmの微細なクラックが認められた。尚、C シリンダの吐出弁はクラックが認められた他は、弁座シート面、弁板、緩衝板、弁バネ及び緩衝バネの破損や磨耗・変形他の異常等は認められなかった（図３．８参照）。
圧縮機の運転中の状態に関しては、流量低下や吐出温度上昇といったバルブの上記不具合によるプロセス的な変調は認められず、また五感判断でも特に異常は感じられなかった。このことは音響モニタリングにおいて、平成 17 年 12 月に設定した閾値を下回るような顕著な異常音が測定されなかったことと一致している。





《ヘッド側》　　　　　　　　　　　《ボトム側》

図３．８　Ｃシリンダ吐出弁の微細なクラック

微細なクラックが認められたＣシリンダーヘッド側吐出弁について、現状の音響モニタリングシステムにおいて観察されるピーク値の時系列データを図３．９に示す。本データは不具合バルブと正常バルブ（開放点検/バルブ交換後）が取り付けられている期間のモニタリングシステム出力結果（ピーク値、ピーク値平均値、変動幅の時刻歴変動傾向）が示されている。結果として現状設定しているどのフィルタにおいても、ピーク値のばらつきやピーク値平均値はバルブ交換前後（バルブ不具合有り無し）で有意な差はみられず、不具合の傾向を捉えることは困難であった。

今回の点検で弁板に見つかった微細なクラックは、プロセス異常には至らない極めて軽微な故障であるものの、トラブルの予兆と捉えることができる。蓄積した音響データの解析を進めると共に、これらの初期故障をも検出できる閾値の最適化・設定に継続して取り組むべく、後述の通り、他の周波数帯域に関して不具合バルブの傾向有無をさらに詳細に分析/検討した。

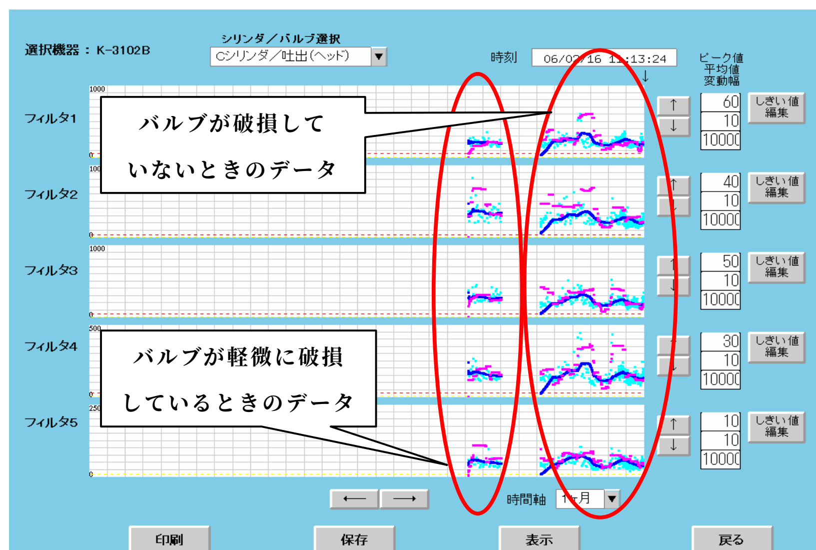


図３．９　モニタリング出力画面

３．５．２ 初期異常検知の可能性評価

現状のバンドパスフィルタ以外の周波数帯域におけるピーク値傾向を観察するため、波形データに中心周波数 500Hz～23500Hz、250Hz ピッチでバンドパスフィルタをかけ、ピーク値を時系列にプロットした。

加えて、平均処理を行い、バルブ不具合時と正常時の差がどの周波数帯域で確認できるか検討を行った。結果として、1500Hz、1750Hz 帯域において、ピーク値ならびにピーク平均値に関する差が観察された（1750Hz の結果について図３．１０参照）。
ピーク値については、不具合時が正常時に比べばらつきが少なく、ある範囲で集中している傾向が観察された。一方で、正常時においては、ばらつきが大きく、所々で大きいピーク値を示す傾向が見られた。
全体的に不具合時の値は小さい傾向に見えるものの、ばらつきによって明確に傾向を捉えることが困難であった。ピーク値データ 30 個を母集団として平均処理を行い、バルブ不具合時と正常時の差について考察を行った。特に 1750Hz 帯域に関しては、不具合時と正常時の値の差があり、バルブ状態の違いが現れているものと判断された。

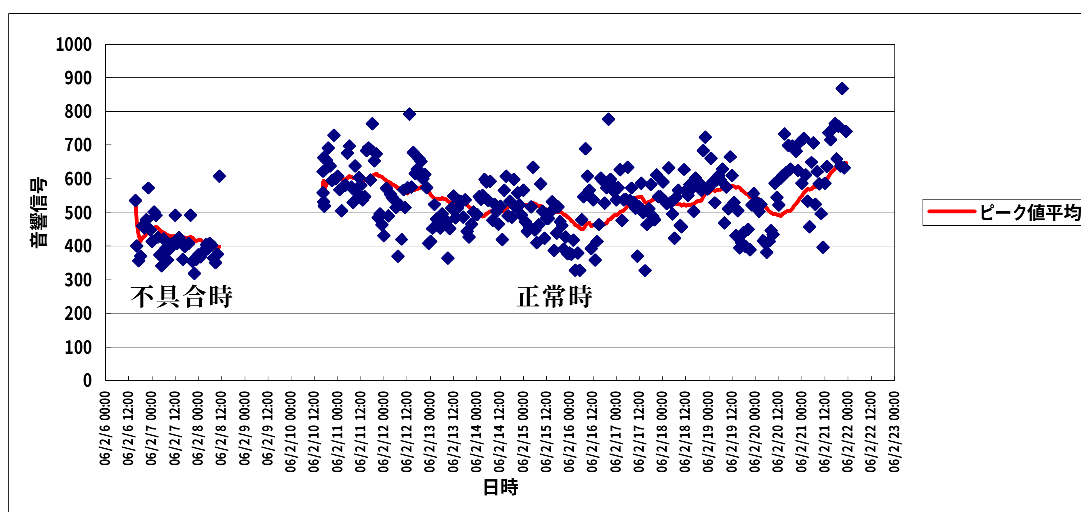


図３．１０ ピーク値分析結果

今回の分析は、開放点検の結果（バルブ不具合の確認）に基づき、ピーク値の詳細分析を行ったものである。結果として、1750Hz 付近において不具合時/正常時の特性が異なることが観察され、不具合の状態を捉えているものと推察された。本結果を踏まえ、以下の点に留意することによって確度のある異常検知が行えるものと考えられた。
・各破損モード（磨耗、割れなど）に対する最適な特性周波数設定
・最適な平均値、統計値の取り扱い
今後運用を進めていく中でデータと破損モードの対応を蓄積し、さらに検知精度の高いシステムに成長させることが可能と判断される。

４．まとめ

４．１　平成１５～１７年度の研究開発

製油所において重要機器となる往復動圧縮機に関して、最適な音響モニタリングシステムを開発し、連続運転の阻害要因となるバルブシリンダバルブ故障を常時監視することによって健全性の確認/以上の早期検知を図り、製油所の長期連続運転に資することを目

的として、平成 15～17 年度の研究開発を行った。本研究の成果として、圧力、温度などの運転トレンドデータからは特に異常傾向が見られない程度のバルブの初期欠陥(異常)の検出に対して、有益な知見が得られた。

４．２　今後の課題

バルブのごく軽微な不具合の異常検知のため、蓄積データの統計処理手法による異常傾向診断機能を新たにシステムに組み入れ、診断判定の高度化を図った。過去のデータを詳細に分析することにより異常傾向を確認したものの、実運用中のシステム出力結果では、有意な差は認められず不具合の傾向を捉えることができなかった。

今後実運用でモニタリングシステムを活用する場合に、期待される効果としてバルブのごく軽微な異常の検出が挙げられる。この実運用中にごく軽微な異常を捉えるための課題については、次のような手順で取り組み、フォローアップ研究にて解決を図るものとする。

（１）一般研究を通じて、生産設備で稼動している往復動圧縮機について長期間の連続データ収集／解析を行い、継続して実際のバルブ動作に伴う音響データを蓄積する。

（２）圧縮機開放点検作業による音響モニタリング対象往復動圧縮機の機器状況詳細解析を行なう。

（３）バルブの軽微な異常が確認された場合は、このバルブから発生した音響データに関する詳細解析を実施し、正常時の音響データとの比較を行なうことで、抽出周波数帯域幅や閾値の最適化をさらに進めシステム全体の実用性を検証する。